

Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers / COGIT COMPOSITES

# Estudio de materiales compuestos a altas velocidades de deformacion

Abbas Tcharkhtchi.  
Joseph Fitoussi.  
Michel Bocquet.



<b>I. Contexto del estudio .....</b>	<b>4</b>
I.1 Materiales compuestos .....	5
I.1.1. Introducción a los materiales compuestos.....	5
I.1.2. Materiales estudiados. ....	6
I.2 Máquina de ensayos de alta velocidad.....	8
I.3 Sistema de medición y adquisición de datos.....	9
I.2.1.Introducción .....	9
I.2.2. Medida de las tensiones.....	9
I.2.3. Medida de las deformaciones .....	9
I.2.4. Cámara de alta velocidad .....	10
I.4 Estudio de alta velocidad .....	11
 <b>II. Estudio sobre la geometría de las probetas .....</b>	 <b>12</b>
II.1 Introducción .....	13
II.2 Problema de deslizamiento en las probetas rectas.....	13
II.3 Optimización de la zona útil.....	14
 <b>III. Ensayos realizados y estudios experimentales.....</b>	 <b>16</b>
III.1 Procedimiento para analizar los datos.....	17
III.1.1 Datos de tensiones .....	17
III.1.2 Datos de las deformaciones .....	18
III.1.3 Obtención del módulo de Young.....	20
III.2 Comparación de resultados .....	21
 <b>IV. Conclusión .....</b>	 <b>21</b>

Año: 2012

N° de PE:

NOTA: 12/20

Este proyecto ha sido realizado en la École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers en el centro de París, en conjunto con la empresa francesa Cogit Composites, formando parte de un programa Erasmus Doble Titulación. Se realizó en el departamento de polímeros de la escuela.

La nota obtenida fue de 12/20.

La realización del proyecto contiene información confidencial que no se ha escrito ni en la memoria en francés ni en la memoria en español.

# Capítulo I:

## Contexto del estudio

## I.1. Materiales compuestos

### I.1.1. Introducción y caracterización de los materiales compuestos

Un material compuesto está constituido por la unión de al menos dos otros materiales de naturalezas distintas. El objetivo de esta unión es formar una sinergia de tal forma que las propiedades mecánicas, químicas, etc. sean mejores que las propiedades de estos materiales por separado.

El material compuesto contiene una fase continua (matriz) y una fase discontinua (refuerzo). El refuerzo está formado por fibras largas, cortas o estructuras del material más resistente. Es realmente el material que va a soportar todos los esfuerzos. La matriz por el contrario, suele estar realizada de un material de propiedades mecánicas inferiores al material del refuerzo y su misión es la de mantener la estructura del conjunto y transmitir los esfuerzos entre las fases discontinuas.

La razón por la que el material más resistente se utiliza en forma de fibras es porque de esta forma reducimos de forma considerable el contenido de defectos y el material se asemeja más a su comportamiento ideal.

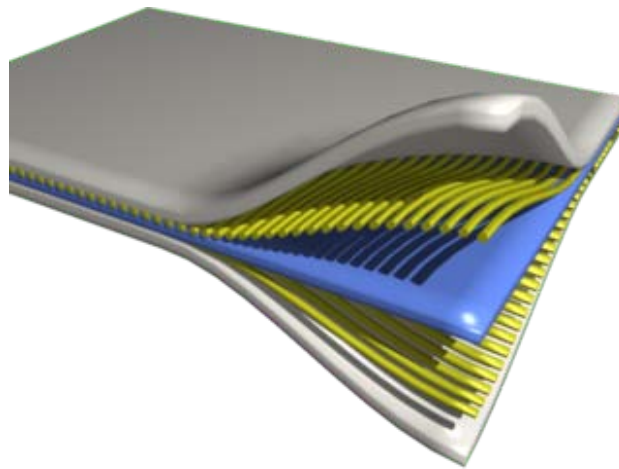


Figura 1. Ejemplo de material compuesto.

En el contexto de nuestro proyecto, se realizará el estudio de 2 materiales distintos: fibra de carbono con matriz epoxy y fibra de vidrio con matriz de epoxy. Se realizarán ensayos de tracción a alta velocidad para conseguir una elevada velocidad de deformación, simulando velocidades de impacto, que será la aplicación que tendrán estos materiales en la industria aeronáutica y automovilística.

### I.1.2. Materiales estudiados.

- La resina Epoxy es una resina termoestable fabricada por polimerización de monómeros de epoxida con un agente endurecedor (anhídrido de ácido o fenol).

Cuando sometemos esta mezcla a alta temperatura tienen lugar una serie de reacciones químicas que crean una red molecular tridimensional mediante el proceso irreversible de polimerización.

Como regla general, las matrices termoestables poseen una baja resistencia al impacto y a la temperatura.



Figura 2. Detalle de un material carbono - epoxy

#### - Carbono epoxy

El primer material estudiado es un estratificado de resina epoxy reforzada por un tejido de fibras largas de carbono. Es un tejido equilibrado ya que tiene el mismo número de láminas en cada dirección. Este material se utiliza para aplicaciones en las que se necesita una elevada resistencia mecánica y un peso reducido.

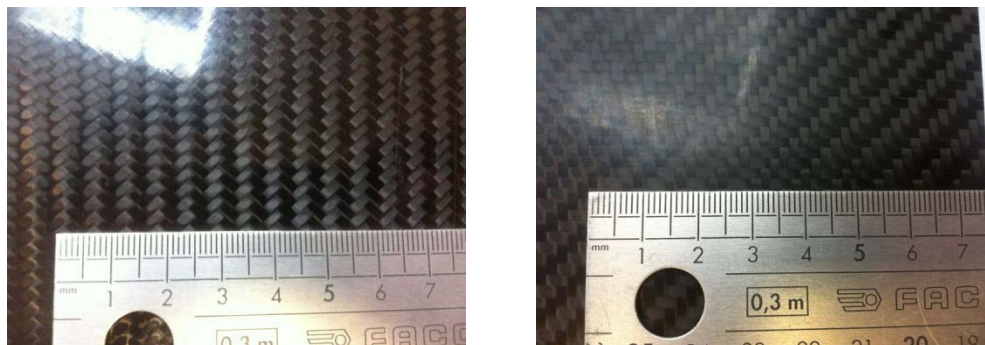


Figura 3. Orientación de las fibras a  $\pm 45$  et a  $0/90$  grados.



Figura 4. Placas de los materiales estudiados.

- **Fibra de vidrio - epoxy**

El segundo material estudiado está formado por una matriz de epoxy reforzada por fibras largas de vidrio. Considerando la relación resistencia mecánica – peso, para la misma resistencia mecánica el peso disminuye un 70% que para la misma resistencia en una estructura en acero.

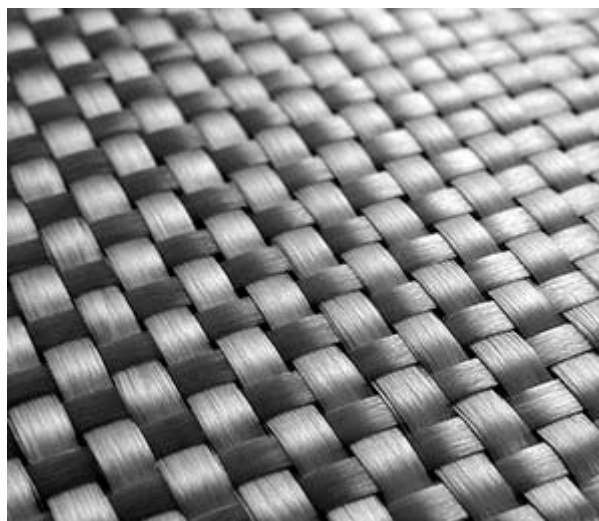


Figura 5. Tejido de material compuesto.

## I.2. Máquina de ensayos de alta velocidad

La máquina utilizada para la realización de los ensayos para este proyecto es una máquina de alta velocidad de tracción uniaxial del departamento de polímeros de la escuela Arts et Métiers (PIMM).

Esta máquina está dotada de un captor de fuerza piezoeléctrico con una capacidad máxima de 50kN. La tracción la realiza un cilindro hidráulico capaz de desplazarse a una velocidad de 20 m/s y una carrera de 135 mm.

El material piezoeléctrico emite una señal eléctrica proporcional a la fuerza que soporta. Esta señal ha sido tratada para convertirla en datos sobre la fuerza a la que ha sido sometida la probeta y obtener, de esta forma, las curvas y todos los demás parámetros. La figura 6 es un esquema de esta máquina.

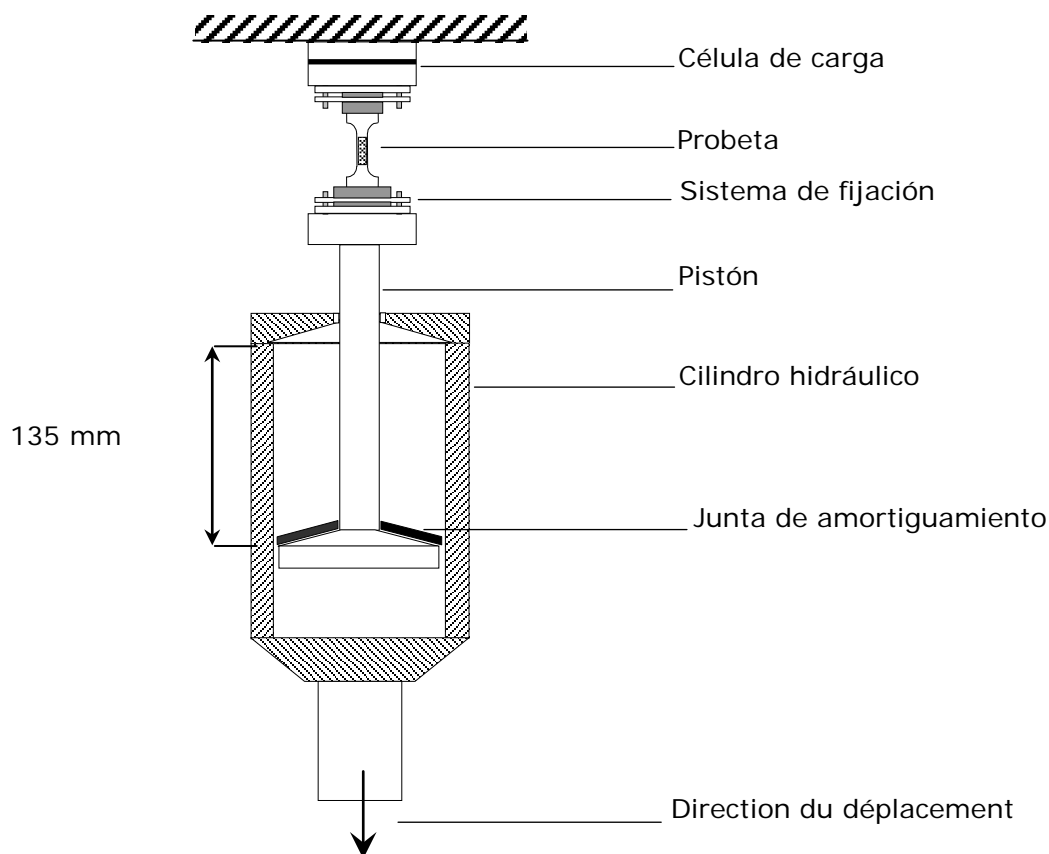


Figura 6: Esquema de la máquina de tracción.



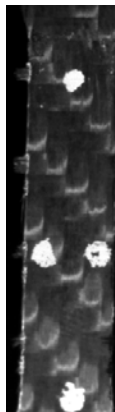
## I.3 Sistema de medición y adquisición de datos

### Introducción

En la realización de un ensayo de tracción simple, existen tres medidas esenciales: esfuerzo, velocidad de sollicitación y campos locales de desplazamiento. El esfuerzo de sollicitación es medido por la célula de carga. La velocidad de deformación se ha medido de la siguiente forma:

### Medición de la deformación

La medición de los desplazamientos se ha realizado a partir de una metodología óptica, en lugar de utilizar galgas extenso métricas o cualquier otro sistema.



Se han situado varios puntos en la zona útil de la probeta. A medida que se realizaba el ensayo de tracción, se iban tomando imágenes con una cámara de alta velocidad. Posteriormente se analizó cada fotograma de cada ensayo con un programa de tratamiento de imágenes, ImageJ.

El programa ImageJ calcula el centro geométrico de cada una de las 4 marcas para cada fotograma y calcula igualmente la distancia existente entre cada uno de los centros de los puntos.

Los datos mencionados se exportaron a Excel y mediante ecuaciones de mecánica de medios continuos se obtuvo la información de desplazamiento de cada punto en función de la fuerza y en función del tiempo.

### Medición de la tensión

La máquina de tracción proporciona una fuerza gradualmente hasta que se consigue la ruptura del material. Esta fuerza es medida por el captor piezoeléctrico y convertida en una señal eléctrica cuya tensión es proporcional a la fuerza aplicada.

Los datos de esta fuerza fueron convertidos en tensión aplicando ecuaciones básicas de medios continuos, conociendo las dimensiones de la probeta.

### Cámara de alta velocidad

El departamento de polímeros nos proporcionó una cámara de alta velocidad con las siguientes características:

PHOTRON Fastcam APX-RS, con capacidad para registrar hasta 250 000 imágenes/segundo.

- Definición máxima : 1024x1024 píxeles
- Tamaño de un píxel: 17 $\mu$ m x 17 $\mu$ m
- Velocidad de almacenamiento de la máxima definición(1024x1024 píxeles): 3000 i/s
- Intervalo mínimo entre 2 imágenes : 2 $\mu$ s
- Codificado: 8 bits



Figura 8: Cámara de alta velocidad

La cámara posee una memoria interna de 2.6 GB para el almacenamiento intermedio de imágenes.

## I.4 Estudio de alta velocidad

Cuando hablamos de velocidad de deformación de un material podemos dividir esta velocidad en tres intervalos distintos.

- Comportamiento cuasi estático en el que la velocidad de deformación se mantiene por debajo de  $10^{-3} s^{-1}$ . En este caso, el comportamiento del material se asemeja al comportamiento ideal del mismo y por tanto, puede ser predicho por las ecuaciones de la mecánica de medios continuos.
- Caso de velocidades intermedias. Ensayos en los que la velocidad de deformación está comprendida entre  $10^{-3} s^{-1}$  y  $10^4 s^{-1}$ . En este caso, las leyes de mecánica de medios continuos se pueden aplicar con precauciones.
- Velocidades de crash. A altas velocidades, por encima de  $10^4 s^{-1}$ , los efectos de la inercia no son despreciables y los cambios del material no son uniformes. Además, se producen ondas de tracción/compresión que se propagan rápidamente por todo el material. Se necesita, por tanto, un modelo matemático en el que intervengan estas ondas, los efectos de inercia, los efectos de mecánica de materiales, etc.... El objeto de este estudio es, por tanto, proporcionar los resultados del comportamiento de estos materiales a alta velocidad y dejar abierta una línea de investigación para continuar la elaboración de este modelo.

Los ensayos a alta velocidad de deformación tienen una gran importancia en sectores como el automovilístico y aeronáutico ya que permiten estudiar los materiales y ser capaces de elaborar modelos capaces de predecir el comportamiento a velocidades de impacto.

## Capítulo II:

### Estudio de la optimización de la geometría de las probetas

## II.1 Introducción

La geometría de las probetas constituye un punto importante para la realización eficaz de los ensayos.

La geometría de las probetas se ha adecuado a la naturaleza del material ( $\pm 45^\circ$  o  $90^\circ$ ) y al tipo de ensayos.

Las probetas han sido cortadas a la forma y tamaño deseados mediante la aplicación de un chorro de alta presión, evitando, de esta forma, dañar el material con la fricción producida por una cuchilla así como para reducir los efectos de bordes que hubiesen sido agravados si el material se hubiese construido con la forma de las probetas.

Uno de los factores determinantes para la elección de la probeta era la posibilidad de elegir probetas lo más pequeñas posibles para aprovechar al máximo el material disponible, reducir costes y hacer el máximo número de experimentos. Por otro lado contábamos con la restricción de tamaño mínimo, puesto que debimos elegir un tamaño suficientemente grande para que la probeta contuviese un volumen representativo del material.

## II.2 Problema de deslizamiento en las probetas rectas.

La elección de unas probetas rectangulares conllevó a un deslizamiento a altas velocidades, produciendo así ensayos no válidos.

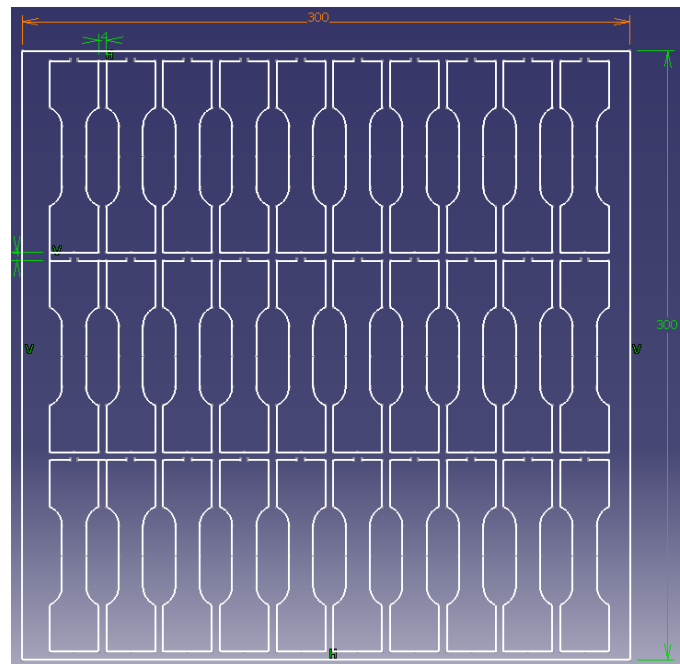


Figura 15. Ejemplo de deslizamiento.

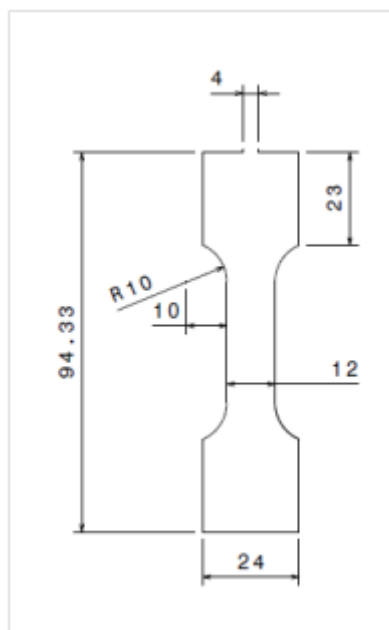
## II.3 Optimización de la zona útil

La geometría de la zona útil de la probeta está definida por una anchura de 6 a 8 mm en el caso de carbón-epoxy. Esta dimensión permite mantener una zona representativa del tejido. Por el contrario, para el material vidrio-epoxy, la zona útil va de 10 a 12 mm puesto que los tejidos son más amplios. El espesor de cada probeta es de 2.6mm y la longitud de la zona útil varía entre 16 y 30mm.

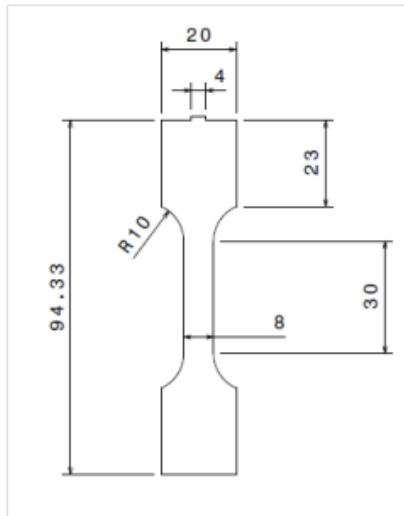
A continuación se muestra la plantilla realizada en Catia que se siguió para cortar las placas de material compuesto suministrado por la empresa.



- Optimización de la geometría para el caso de vidrio-epoxy



- Optimización de la geometría para el caso de carbono-epoxy



**Nota:** Los datos de la optimización han sido recogidos del estudio de optimización realizado por un colaborador del departamento de la escuela que realizó una tesis sobre este dominio en la *École supérieure des techniques aéronautiques et de construction automobile (ESTACA)*.

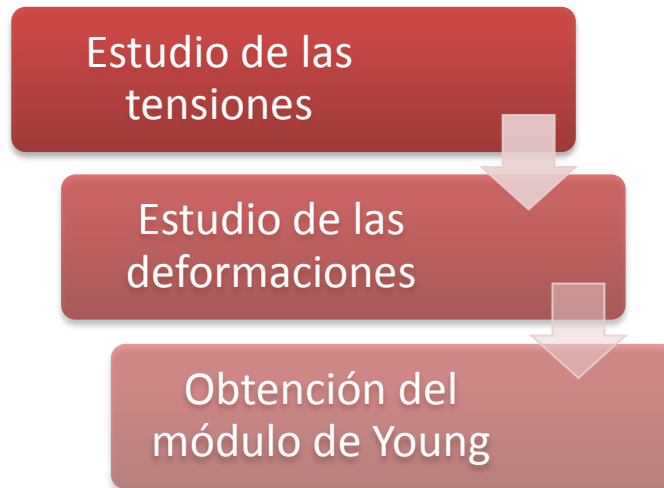
## Capítulo III:

### Ensayos y estudio experimental



## III.1 Procedimiento para analizar los datos.

Para analizar los datos recogidos por la máquina de tracción, la cámara y el ordenador se ha seguido la siguiente secuencia

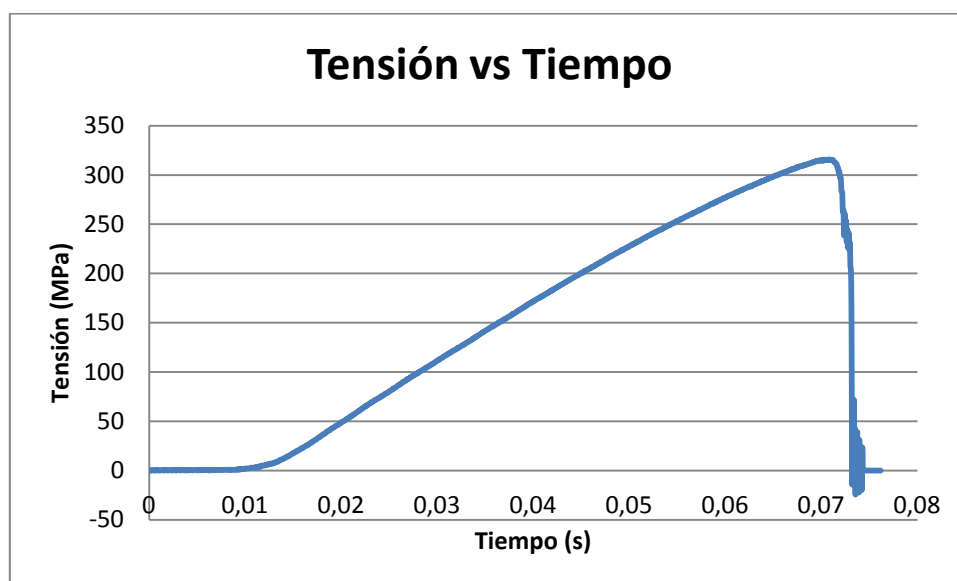


### III.1.1 Datos de tensiones

El captor de fuerza de la máquina nos da un valor expresado en Voltios. A partir de la curva de tensión la convertimos en Newtons. Por último, dividimos entre la sección de la zona útil de la probeta (34.32 mm<sup>2</sup> para el vidrio, 21.36 mm<sup>2</sup> para el carbono) y obtenemos así las tensiones.

La curva representa la tensión frente al tiempo.

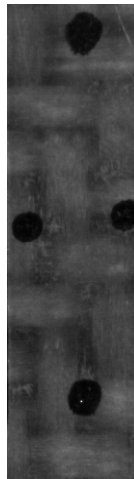
A continuación explicaremos el proceso con el ejemplo de uno de los ensayos.



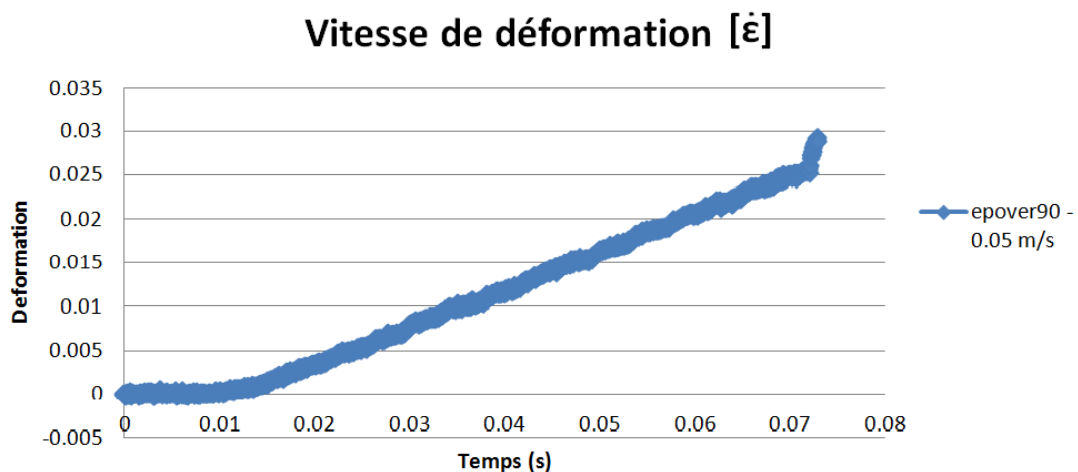
La tensión máxima es:  $\sigma_{max} = 315,77 \text{ MPa}$

### III.1.2 Datos de las deformaciones

Para estudiar la deformación de las probetas se ha utilizado una cámara de alta velocidad. En la siguiente imagen se muestran las marcas que se han utilizado como referencia para el cálculo de las deformaciones.

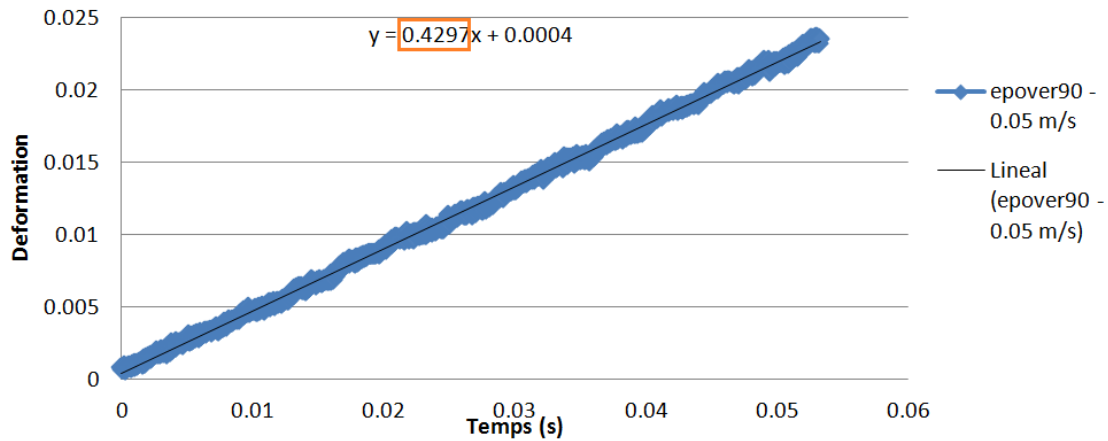


Una vez explotados los datos de la distancia de los centros geométricos de las marcas, se calcula la deformación dividiendo la distancia de cada punto a cada momento dividido entre la distancia inicial. Obtenemos la siguiente curva:



Dado que en esta gráfica se representa la deformación frente al tiempo, la pendiente se corresponde con el dato de velocidad de deformación ( $\dot{\epsilon}$ ). Para el cálculo de esta pendiente eliminaremos los tramos no lineales de la curva.

## Vitesse de déformation [é]



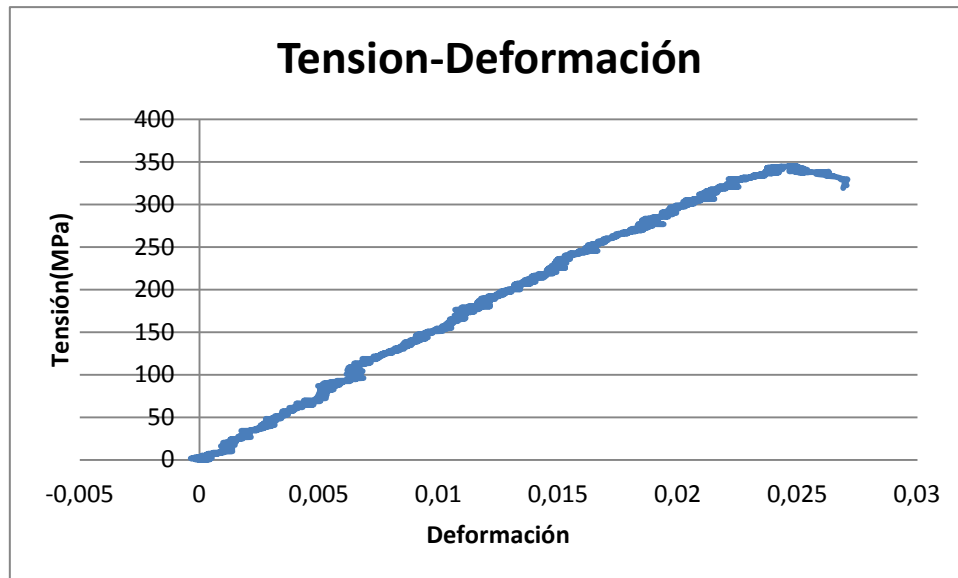
En esta gráfica se han eliminado los tramos no lineales de la grafica y se ha aproximado una recta, cuya ecuación se recoge en el mismo. El término que acompaña a la x (tiempo) es la pendiente. El término independiente debería ser 0 pero no es así debido a errores experimentales pero es despreciable.

Para este ensayo, la velocidad de deformación experimental es  $0.4297 \text{ s}^{-1}$ . Estos datos corresponden con un ensayo de una probeta de vidrio-epoxy, láminas a 0 y 90 grados y una velocidad de sollicitación de 0.05 m/s. Evidentemente no es un ejemplo de alta velocidad pero se han ido haciendo ensayos desde velocidad de régimen cuasiestático hasta velocidad de crash para ver la variación y comprobar que, efectivamente, el procedimiento experimental y de cálculo es el correcto.

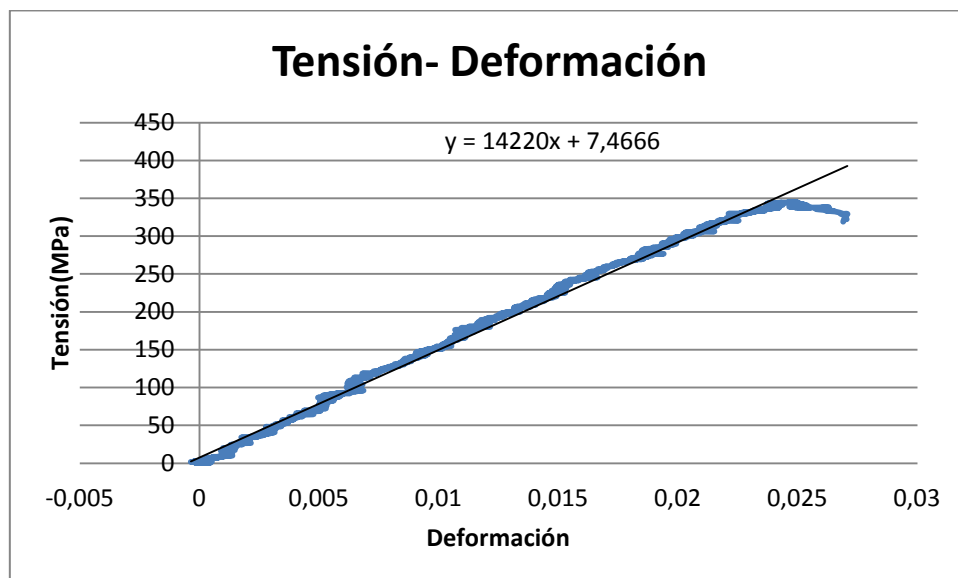
Debido a la elasticidad de los componentes de la máquina, la velocidad de deformación teórica no es la misma que la velocidad experimental. Por esta razón, realizaremos los cálculos en paralelo con la información experimental y la teórica.

### III.1.3 Obtención del módulo de Young

Una vez analizadas las imágenes, obtenemos la deformación en función del tiempo. Como también teníamos los datos de tensión frente al tiempo, podemos establecer la relación tensión-deformación, tomando para cada instante los dos valores y representándolos en la gráfica siguiente:



La pendiente del tramo lineal de esta curva es el Módulo de Young o de Elasticidad en la dirección longitudinal de las probetas.



$$E_{0.05}^{epover90} = 14,22 \text{ GPa}$$

Estos datos se corresponden igualmente con una probeta a 0.05m/s para el caso de material vidrio-epoxy a 0/90 grados.

Este procedimiento ha sido seguido para cada material, velocidad y orientación de fibras.

Para las orientaciones  $\pm 45$  grados, se ha aplicado el mismo procedimiento. En este caso, al haberse aplicado un esfuerzo longitudinal con la probeta, coincide con la dirección  $\pm 45$ . De esta forma obtenemos las deformaciones angulares, tensiones angulares y módulo de cizalladura.



## III.2 Comparación de resultados

### Carbono - Epoxy $\pm 45$

$v$ (m/s)	$\dot{\epsilon}$ long	$\sigma$ umbral	$\epsilon$ umbral	$\sigma$ ruptura	$\epsilon$ ruptura	$E$ (Gpa)	$G$ (Gpa)	$y_{point}$
<b>0,0001</b>	0,0029	104	0,0097	156,835206	0,123	10,7	4,5	0,0062
<b>0,05</b>	8,63	126,5	0,0163	180,614076	0,097	7,8		
<b>0,05</b>	8,4	130	0,0157	188,592385	0,1148	8,3		
<b>0,05</b>	8,16	128,2	0,0147	178,760924	0,1	8,7		
<b>0,5</b>	58,24	138,8	0,018	184,925094	0,108	7,7		
<b>0,5</b>	61	140,8	0,016	192,240169	0,105	8,8		
<b>0,5</b>	9,68	135,2	0,015	190,777154	0,107	9,0	4,1	22,5
<b>1,6</b>	162,9	150	0,017	197,936174	0,1106	8,8		
<b>1,6</b>	157,4	139,2	0,015	182,720818	0,0899	9,3		
<b>1,6</b>	144,22	121,3	0,01	197,819132	0,1	12,1		
<b>2,5</b>	299	141,2	0,014	198,248283	0,1	10,1		
<b>2,5</b>	310,5	146,2	0,016	181,862516	0,094	9,1		
<b>2,5</b>	306,5	143,4	0,014	190,0554	0,1067	10,2		
<b>2,5</b>	50,85	153	0,025	190,543071	0,1102	6,1	7,3	104
<b>3,5</b>	521,7	156	0,02	184,172686	0,0913	7,8		
<b>3,5</b>	495,6	160	0,01	190,445537	0,0851	16,0		
<b>3,5</b>	495,6	126	0,0108	195,34176	0,0953	11,7		
<b>4,1</b>	827,6	160	0,025	188,397316	0,09637678	6,4		
<b>4,1</b>	537,8	149	0,016	200,472066	0,09826474	9,3		

## Carbone - Epoxy 0/90°

<u>v (m/s)</u>	<u>ε̇</u>	<u>σ</u> <u>umbral</u>	<u>ε</u> <u>umbral</u>	<u>E(Mpa)</u>	<u>σ ruptura</u> <u>(Mpa)</u>	<u>ε ruptura</u>
0,0001	0,0003	420	0,006	70,0	490,5	0,0075
0,0001	0,0006	430	0,005	86,0	492,450843	0,00625848
0,05	0,2417				590,589888	0,01230448
0,05	0,2984	564	0,013	43,4	625,585206	0,01549152
0,5	1,3997	564	0,01	56,4	642,790262	0,01183179
0,5	1,4725	472	0,008	59,0	632,607678	0,01144729
1,6	7,2993	485	0,011	44,1	648,876404	0,01533075
1,6	4,6063	506	0,008	63,3	695,107678	0,0111528
2,5	25,74	490	0,013	37,7	640,449438	0,01436189
2,5	20,046	541	0,01	54,1	590,472846	0,01138826
3,5	30,779	530	0,011	48,2	651,568352	0,01208327
4	30,307	897	0,01	89,7	925,678839	0,01086597

## Vidrio – Epoxy +/- 45

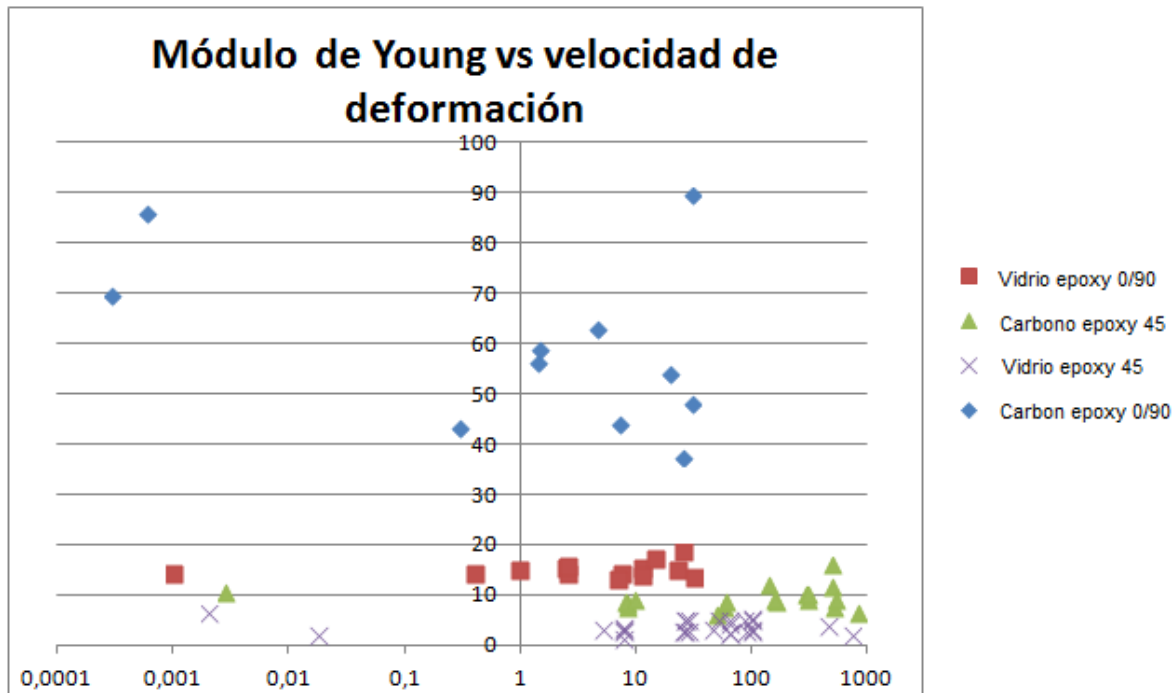
<u>v (m/s)</u>	<u>ε̇</u>	<u>GammaPoint</u>	<u>σ</u> <u>umbral</u>	<u>ε</u> <u>umbral</u>	<u>E (Gpa)</u>	<u>G (Gpa)</u>	<u>σ ruptura</u>	<u>ε ruptura</u>
0,0001	0,002		26	0,004	6,5		64,0	0,037
0,0001		0,0033	41	0,012	3,4	3,40	62,8	0,035
0,0001	0,0178		30	0,013	2,3		49,8	0,048
0,05	7,53		42	0,012	3,5		72,9	0,058
0,05	7,55		37	0,027	1,4		49,8	0,064
0,05	7,7		48	0,016	3,0		72,2	0,06
0,5	7,68		55	0,017	3,2		90,7	0,064
0,5	5		58	0,017	3,4		84,4	0,05
0,5		14	64	0,022	2,9	2,50	90,3	0,062
1,6	26		90	0,017	5,3		158,9	
1,6	25,45		70	0,023	3,0		98,9	0,072
1,6	26,1		83	0,016	5,2		141,9	0,072
1,6	26,04		63	0,023	2,7		88,3	0,072
1,6	27,9		92	0,018	5,1		136,5	0,064
1,6	27,57		60	0,021	2,9		84,9	0,066
1,6		48	70	0,022	3,2	2,69	98,5	0,07
2,5	63,6		80	0,016	5,0		139,4	0,078
2,5	63,5		60	0,023	2,6		86,8	0,078
2,5	45,05		70	0,022	3,2		99,1	0,071
2,5	64		90	0,02	4,5		141,4	0,066

2,5	64	66	0,027	2,4	88,0	0,068	
2,5	50	120	0,024	5,0	158,4	0,036	
2,5	88	71	0,034	2,1	3,09	86,7	0,077
3,5	454,7	120	0,03	4,0	158,2	0,072	
3,5	98,7	115	0,022	5,2	171,3	0,054	
3,5	98,3	80	0,028	2,9	106,6	0,054	
3,5	83,5	115	0,023	5,0	159,5	0,056	
3,5	99,5	72	0,023	3,1	99,3	0,056	
4	97,8	107	0,02	5,4	162,8	0,058	
4	87,6	73,8	0,025	3,0	101,3	0,058	
4	726,9	60	0,03	2,0	73,5	0,076	
4	177,8	80	0,03	2,7	1,33	101,3	0,058

## Vidrio – Epoxy 0/90

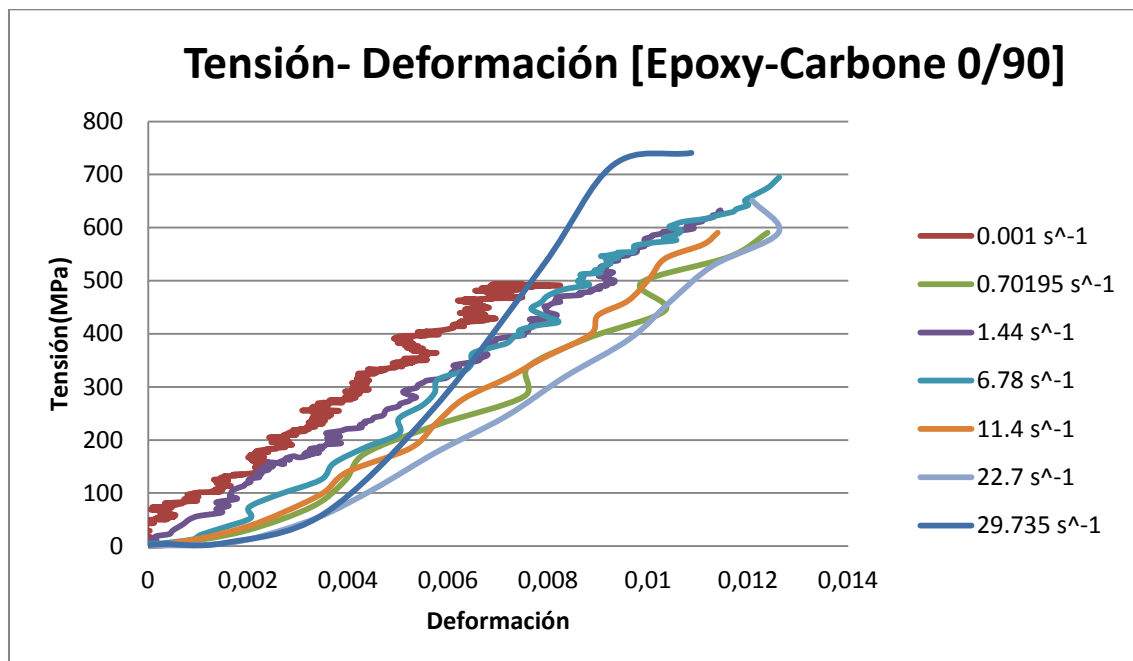
<u>v (m/s)</u>	<u>ε</u>	<u>σ</u> <u>umbral</u>	<u>ε</u> <u>umbral</u>	<u>E (Gpa)</u>	<u>σ ruptura</u>	<u>ε ruptura</u>
0,0001	0,001	231	0,016	14,4	248,47028	0,018
0,05	0,398	284	0,02	14,2	315,777972	0,025
0,05	0,95	300	0,02	15	345,061189	0,02478
0,5	2,45	310	0,02	15,5	346,518065	0,026
0,5	2,56	301	0,021	14,3	352,564103	0,0267
0,5	2,5	363	0,023	15,8	390,588578	0,0285
1,6	7,409	380	0,027	14,1	403,263403	0,031
1,6	6,817	351	0,027	13	376,165501	0,033
2,5	11,13	367	0,024	15,3	410,912005	0,027
2,5	11,11	378	0,027	14	405,157343	0,031
2,5	14,48	256	0,015	17,1	425,699301	0,03
3,5	24,8	370	0,02	18,5	408,581002	0,028
3,5	22,8	371	0,025	14,8	427,59324	0,033
4	31,2	394	0,029	13,6	438,592657	0,036

Podemos agrupar los datos en el gráfico siguiente:



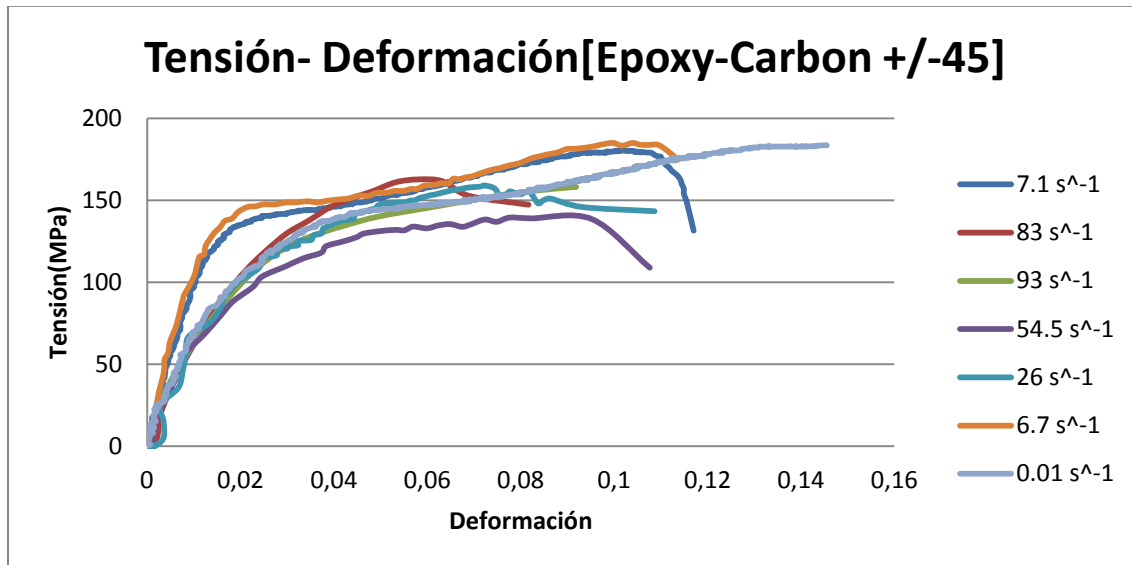
Los gráficos siguientes presentan las curvas de tensión-deformación. A partir de estas curvas podemos determinar el módulo de Young (parte lineal), la tensión elástica máxima, la tensión de rotura década material y todo esto para las 7 velocidades diferentes.

• Curva tensión deformación EPOXY-CARBONO 0/90

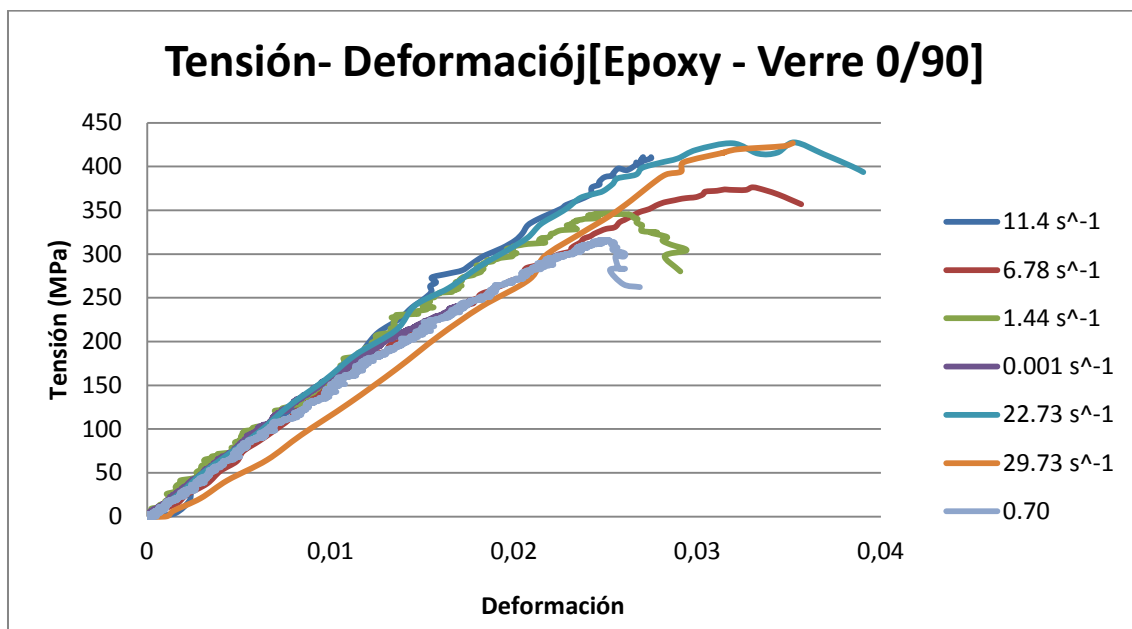




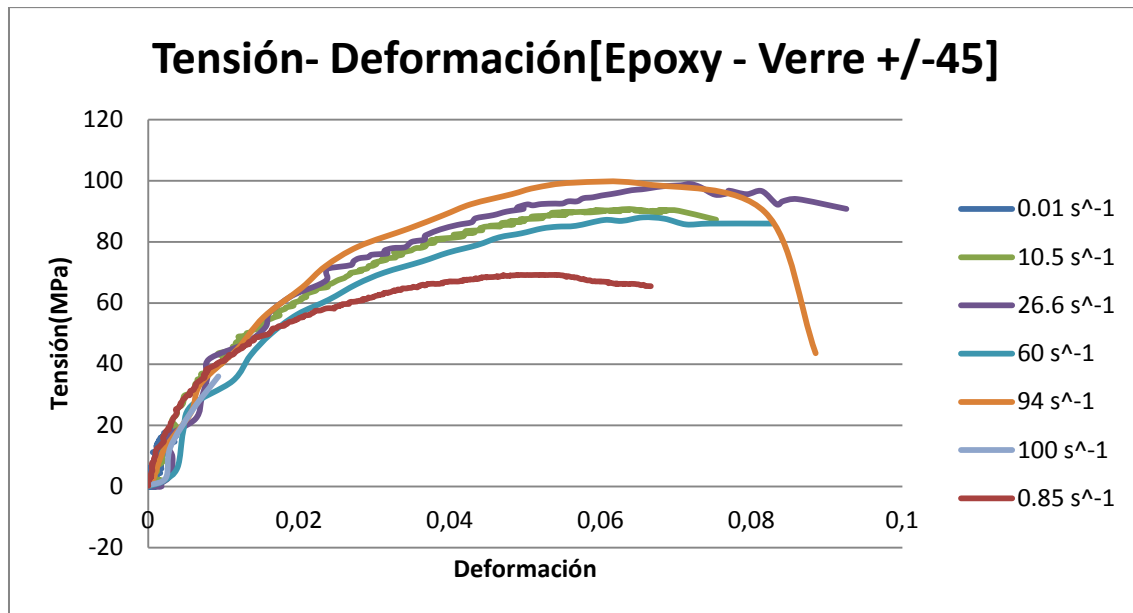
• Curva de tensión-deformación EPOXY-CARBONO +/-45



• Curva de tensión deformación EPOXY-VIDRIO 0/90



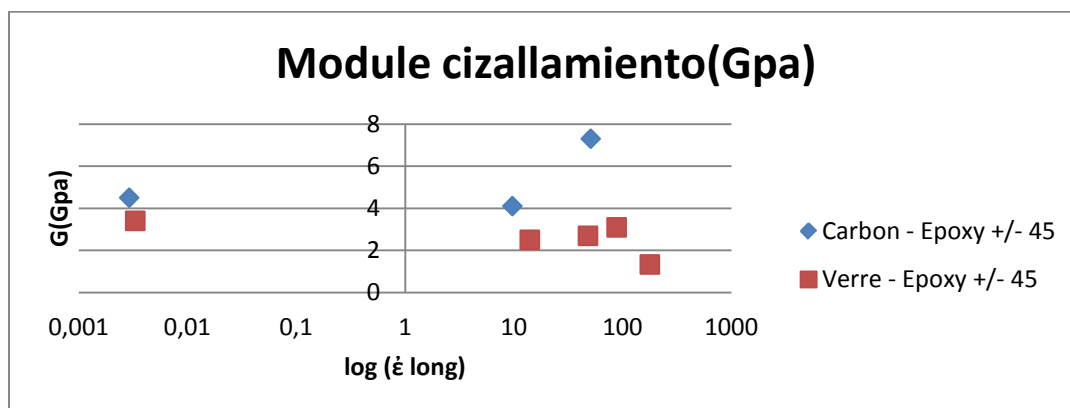
• Curva de tensión - deformación EPOXY-VIDRIO +/-45



La definición teórica del módulo de cizalladura  $G$  es:

$$G = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{F/A}{\Delta x/l} = \frac{F \cdot l}{\Delta x \cdot A}$$

A partir de la deformación horizontal de los puntos, podemos calcular el módulo de cizallamiento de una forma empírica.



## Capítulo IV:

### Conclusión

Los resultados experimentales del estudio de tracción para el material a base de carbono-epoxy confirman que las características mecánicas del carbono son más elevadas que las del vidrio, presentando además, un módulo de Young superior para las dos orientaciones.

Analizando las imágenes de alta velocidad podemos confirmar que existen dos medios de fallo distintos para cada orientación. En el caso de la orientación de 0/90, el fallo del material se produce por una ruptura de la matriz seguida de una ruptura de las fibras. Por el contrario, en el caso de las orientaciones  $\pm 45$  el fallo del material se produce por una ruptura de la matriz y un deslaminado de las capas que contienen las fibras. Por esta razón, al no romperse las fibras, el material falla antes (para una tensión menor). Además, dado que la resina epoxy es más elástica que las fibras, esta orientación presenta un módulo de Young mucho más reducido. Es posible que el material elegido para la matriz en las orientaciones  $\pm 45$  no sea el más adecuado ya que presenta una muy baja resistencia a la cizalladura.

Notas de clase de Elasticidad y Resistencia de los Materiales I y II:

NAVARRO Carlos.- *Materiales compuestos y sus aplicaciones*.- Universidad Carlos III de Madrid

Analyse et modélisation multi-échelles du comportement mécanique sous sollicitations rapides de composites:

ZOUHAIR J.- France : ESTACA.

Tenue d'assemblages de composites sous sollicitations dynamiques

PARDO S.- Paris : Ecole Nationale des Arts et Métiers.

Matériaux composites, comportement mécanique et analyses des structures

BETRTHÉLOT J.- France.

Dimensionnement au crash de pièces composites pour l'automobile. CARBAJOSA D.- Paris. École Nationale des Arts et Métiers. 2012